

INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS DE FLUCTUACIONES

Farid Chejne Janna

TRABAJO DE PROMOCIÓN A PROFESOR ASOCIADO



Grupo Recursos y Procesos Térmicos - Instituto de Energía
Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia- Medellín

2002



INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS DE FLUCTUACIONES

Farid Chejne Janna



**Grupo de Estudios en Energía –
Instituto de Energía - Escuela de Procesos y Energía,
Facultad de Minas**

Universidad Nacional de Colombia- Medellín

2002

36-7
43

CONTENIDO

	1
Introducción	
1. CONCEPTOS BÁSICOS	4
1.1. Nuevas estructuras en la Naturaleza	4
1.2. Sistemas Termodinámicos	12
1.3. Sistemas en Equilibrio y Fuera del Equilibrio	13
1.4. Sistemas Conservativos y Disipativos	15
1.5. Estabilidad de los Sistemas	16
1.6. Orden y desorden	17
1.7. Irreversibilidades en la Naturaleza	20
1.8. Conceptos De Macroestados Y Microestados	22
2. FLUCTUACIONES EN LA NATURALEZA	26
2.1. Fluctuaciones y Complejidad	28
2.2. Fluctuaciones en Términos del Tiempo de Relajamiento	29
2.2.1. Caso del Pistón y el Cilindro	31
2.2.2. Caso del cuerpo que se enfría	34
2.3. Fluctuaciones en Términos de una Función de Distribución de Estados Energéticos	37
2.4. Fluctuaciones a Partir de las Ecuaciones de Balance	48
2.5. Teorema de la fluctuación – Disipación	52
3. LA ENTROPÍA Y SU RELACIÓN CON LAS FLUCTUACIONES	57
4. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD E	
 INESTABILIDAD	65
CONCLUSIONES	75
REFERENCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Nuevas Estructuras	6
Figura 2. Esquema ilustrativo de una relación recurrente, la cual transforma el sistema de un tiempo N a otro posterior mediante la aplicación del operador L	8
Figura 3. Evolución en el tiempo del estado de satisfacción y aburrimiento de un individuo para dos estados iniciales diferentes. Izquierdo: inicialmente el individuo satisfecho y no aburrido, Derecho: Inicialmente el individuo ligeramente más satisfecho que aburrido.	10
Figura 4. Esquema ilustrativo del modelo del "Brusselltor"	11
Figura 5. Esquema ilustrativo de un punto de bifurcación	12
Figura 6. Esquema Ilustrativo de los Diferentes Sistemas	13
Figura 7. Sistemas conservativos y disipativos representado en el espacio de las fases	16
Figura 8. Representación en el diagrama de fases un sistema caótico	17
Figura 9. Diferentes estados ordenados	18
Figura 10. Esquema para ilustrar un atractor conformado por el 10% de la población con establecimientos educativos (10a) y para ilustrar la diseminación de los establecimientos educativos sobre todo el territorio (10b)	19
Figura 11. Esquemas ilustrativos de ejemplos donde se aprecia el orden y desorden, dependiendo del punto de vista del observador	20
Figura 12. Esquema para ilustrar procesos irreversibles: El proceso de envejecimiento natural del hombre, la dispersión de tinta en una piscina y la fragmentación de una porcelana frágil en muchos trozos	21
Figura 13. Diagrama De Distribución Microestados y Macroestados Posibles Cuando Se Tiene un Dado	23
Figura 14. Diagrama De Distribución de Microestados y Macroestados Posibles Cuando se Tiene dos Dados	23
Figura 15. Diagrama De Distribución De Microestados Y Macroestados Posibles Cuando se Tiene Tres Dados	23
Figura 16. Diagrama De Distribución Para Un Sistema de Gran Número de Partículas o de Dados	24

Figura 17. Evolución de la distribución de los estados de un sistema desde el equilibrio hasta llegar a otra forma del equilibrio	25
Figura 18. Esquema De Un Sistema Cerrado Que Recibe Calor Desde Una Fuente Externa	28
Figura 19. Esquema para Ilustrar el Significado del Tiempo de Relajamiento del Tiempo de Perturbación (t_p) y la Representación de la Respuesta del Sistema	30
Figura 20. Esquema del Cilindro Pistón	32
Figura 21. Esquema de la disipación en un resorte	33
Figura 22. Esquema de un cuerpo que se enfría	35
Figura 23. Esquema de un elemento de volumen	48
Figura 24. Esquema de un sistema conformado por sistemas 1 y 2	60
Figura 25. Sistemas Lineales y no Lineales	67
Figura 26. Evolución de la de Entropía en el Tiempo Producción	68
Figura 27. Evolución del Cambio de Entropía para Sistemas Fuera del Equilibrio en el Tiempo	69
Figura 28. Ilustración de Casos de Estabilidad Asintótica	70
Figura 29. Ilustración de Casos de Inestabilidad	71

RESUMEN

Una breve disertación sobre las fluctuaciones se presenta en esta monografía, donde se ilustra su relación con la complejidad, las irreversibilidades, con el tiempo de relajamiento y con la generación de entropía. Se plantean definiciones sobre las fluctuaciones con el objetivo de motivar la búsqueda de una acertada explicación al comportamiento y evolución de los procesos naturales.

Se hace una simple descripción de los microestados y macroestados que posee cualquier sistema para justificar la existencia de las fluctuaciones. También se ilustra de manera sencilla la cuantificación de las fluctuaciones en términos del tiempo de relajamiento de cualquier perturbación sobre el sistema, con base en la densidad de probabilidades y en la ecuación de balance.

El último apartado de la monografía trata de una introducción al análisis de estabilidad de los estados energéticos del sistema. Con el análisis de estabilidad se interpreta la evolución de las fluctuaciones presentes en un sistema.

La monografía contiene elementos académicos que pueden ser utilizados en cursos de termodinámica básica y avanzada en el nivel de pregrado y posgrado. Ella contiene un capítulo de conceptos básicos, donde se definen conceptos sobre estructuras, sistemas termodinámicos, equilibrio, sistemas disipativos, orden, desorden e irreversibilidades.

Los aportes originales se pueden apreciar en los siguientes aspectos:

- Haber planteado una monografía donde se enfatiza sobre la similitud entre fluctuaciones, evolución, complejidad y generación de entropía al estilo de Ilya Prigogine.
- Haber resaltado la relación entre fluctuaciones y las irreversibilidades o generación de entropía, para explicar el almacenamiento de energía aún cuando la variable macroscópica permanece fija en el tiempo y en el espacio.

- En presentar un modelo matemático que relaciona variables abstractas como la satisfacción y el aburrimiento para explicar su evolución en el tiempo.
- Otro aporte original es de corte académico al presentar un camino introductorio simple para iniciar al lector en los temas de complejidad y evolución de los sistemas dinámicos.

La monografía debe considerarse como un documento introductorio para iniciar estudios profundos de análisis por fluctuaciones y de estabilidad de los sistemas. Para ampliar los conocimientos en el tema se sugiere que el lector recurra a los textos referenciados en esta monografía.

Introducción

Es común detenerse en cualquier punto del trayecto hacia el campo en un día de descanso, y observar la gran diversidad de la naturaleza. Uno no deja de maravillarse de la enorme variedad de especies en movimiento, creando formas geométricas que dan la impresión de algo desordenado y sin simetría, que en algunas ocasiones para describir dicho espectáculo se trae a colación el apodo de “Complejidad”, y en otras para explicar la precisión con que opera cada transferencia de información entre los elementos constituidos, se acuña la gran frase “La naturaleza es sabia”.

Con la mirada de conjunto al paisaje, sin inmiscuirse en el detalle específico de especies o elementos individuales, uno puede observar conjuntos o aglomerados tomando formas geométricas, ordenadas y coherentes, como si las partes individuales se comunicaran entre si para construir una estructura auto-organizada y armoniosa de figuras espectaculares de gran sentido de admiración. En consecuencia, los elementos individuales se comportan de manera diferente a cuando están unidos a otros de la misma o de diferentes especie.

La colectividad impulsa y motiva acciones cooperativas entre sus elementos constitutivos para obtener como resultado, unas estructuras inesperadas, formación de patrones que se repiten en muchas colectividades y una evolución impredecible en el tiempo y en el espacio, hasta alcanzar el “Caos” (Nicolás and Prigogine, 1977; Nicolis, 1995). Es interesante tener en cuenta que esta moldura creada por el cooperativismo del conjunto de individuos rompen del todo con el principio de superposición (Nicolis, 1995).

Las partes se comunican entre sí para producir algo adicional, que no es posible obtenerla a partir de la suma de la producción de cada individuo por separado. La unión de los elementos genera lo de cada cual, más algo que es producto de la superposición de sus interrelaciones. Por lo tanto, se crea la diversidad que da forma a la complejidad y al comportamiento de la naturaleza.

Los sistemas que parecen ser lo mismo en cualquier punto que se le observe, v.g. los cristales, el gas ideal, etc., son fácilmente comprendidos. O sea que no siempre los grandes sistemas conformados por un gran número de elementos se pueden decir que son complejos. La complejidad se revela una vez esos sistemas no son vistos de la misma manera en cada punto del espacio y en cada ocasión en el tiempo.

Abordar un problema de esta naturaleza implica buscar respuesta a una serie de preguntas formuladas en muchos campos del conocimiento, desde lo biológico hasta lo cosmológico, pasando por los aspectos sociales y económicos. Los comportamientos complejos se aprecian en la forma de comunicarse los individuos, en las relaciones intrafamiliares, en la formación de ondas acústicas a partir de gradientes de temperaturas, en la formación de las franjas negras y blancas de las cebras, en la obtención de patrones espaciotemporales a partir de reacciones químicas, en la obtención de remolinos en corrientes de fluidos sometidos a gradientes de temperatura o de presión, en la ciencia de los materiales, en el ciclo de vida de la ameba, en la formación y crecimiento de poros en el interior del carbón activado y en los sistemas planetarios.

La variabilidad y variedad son características esenciales de los sistemas complejos que hacen difícil la tarea de hallar un conjunto de ecuaciones matemáticas para una observación detallada de su comportamiento, en lugar de ello, se propone una descripción holística o global de las propiedades del sistema, mas que una descripción reduccionista de partículas y elementos individuales. Por lo tanto, ¿Cómo la naturaleza trabaja?, ¿Cómo es que ella toma forma?, ¿Cómo es que ella se auto-organiza?, ¿La naturaleza se auto-organiza como consecuencia de un proceso de maximización o minimización de una función o potencial?, ¿La naturaleza esta dada a priori y por lo tanto se puede determinar o predecir su futuro, o más bien el azar rige su comportamiento?, ¿Cuál es el método que utiliza la naturaleza para resolver de manera eficaz, con precisión y en un tiempo mínimo las relaciones no lineales que rigen su comportamiento? y ¿Cuáles son los métodos adecuados para solucionar los modelos no lineales que dan cuenta de la evolución de los sistemas naturales hasta alcanzar la complejidad?

La respuesta a estos interrogantes permite lograr un modelo unificado sobre el comportamiento de la naturaleza y su complejidad. Precursores como Bejan (1994), Nicolis (1995) y Prigogine (1967) han manifestado de manera explícita el problema desde varios puntos de vista, los cuales, han formulado estrategias para solucionar modelos matemáticos complejos, definiendo cuales principios rigen el comportamiento de la naturales y respondiendo la pregunta porque las no - homogeneidades y las fluctuaciones son necesarias para dinamizar la actividad de la naturaleza.

Un intento en resolver estas inquietudes es imaginarse que la naturaleza no es uniforme, ni lisa, ni regular, está llena de singularidades, inhomogeneidades y de puntos críticos, compuesta de muchos sistemas que interrelacionan entre sí con una alta sensibilidad. Son éstas irregularidades o variaciones con respecto a un patrón de referencia denominadas fluctuaciones, las que permiten la evolución, la formación de nuevas cosas y el cambio.

Las fluctuaciones son variaciones en el valor de cualquier parámetro con respecto a su valor medio o estándar o tomado como referencia, susceptibles de variar ante estímulos externos denominadas perturbaciones. Estas provocan disturbios en el interior de un sistema causando, en algunos casos, relajamiento de la perturbación o disipación conocidos en el mundo macroscópico como fenómenos de difusión, viscosidad, conducción térmica, etc.; y en otros casos, provocan una exageración de las fluctuaciones que arrastran todo el conjunto de manera colectiva, hacia una nueva estructura coherente y autoorganizada.

En esta monografía, se introducirá al lector sobre los conceptos de fluctuaciones como evaluarlas y como se relacionan con la generación de entropía en un sistema, enfatizado de alguna manera que complejidad y fluctuaciones son dos palabras que significan lo mismo. Se busca que el lector adquiriera una iniciación en estos temas para que luego lo aplique en los diferentes casos particulares y de interés para la ciencia y el conocimiento del comportamiento de la naturaleza.

1. Conceptos Básicos

Se describen en este capítulo los conceptos de estructuras, patrones, sistemas termodinámicos conservativos o disipativos, estabilidad e inestabilidad, irreversibilidad, orden y desorden, puesto que las fluctuaciones se relacionan con estos conceptos y permitirá en un futuro orientar al lector en la búsqueda de una posible teoría general de la complejidad.

1.1. Nuevas estructuras en la Naturaleza

Las nuevas estructuras se forman a partir de puntos críticos o estados inestables de sistemas termodinámicos abiertos, donde las fluctuaciones actúan como elementos disparadores de la evolución en el tiempo y en el espacio hasta nuevos estados que se mantienen como consecuencia de fenómenos disipativos (Prigogine, 1967). Estas estructuras observadas en la naturaleza, tienen un patrón que se repite, independiente del tipo de fenómeno (Bak, 1997), las cuales ha sido motivo de estudio y ha cautivado el interés de la comunidad científica en la actualidad (Prigogine and Nicolis, 1989; Glansdorff and Prigogine, 1971; Prigogine, 1996; Nicolis., 1995; Dewel, Kondepudi and Prigogine, 1996; Nicolis and Prigogine, 1977).

El estado en equilibrio, tal como se mencionó antes, podría lograrse si el sistema se aísla (se le retira la fuente de calor u otros posibles flujos) y se espera lo suficiente hasta que las propiedades intensivas del sistema y las correspondientes de los alrededores sean iguales y constantes y además cuando la entropía del sistema alcanza su valor máximo (Callen, 1960). Bajo éstas circunstancias, las fluctuaciones son amortiguadas, no crecen y se mantienen en valores pequeños imperceptibles al nivel macroscópico, en consecuencia los valores de la energía, el volumen y otros parámetros extensivos predichos por el principio del máximo valor de la entropía son los valores promedios (Callen, 1960). De otro lado, si el equilibrio se rompe al suministrar flujo de calor al sistema desde el exterior u otra clase de flujo, el sistema puede alcanzar uno o varios estados estacionarios dependiendo si

la ley de evolución dinámica es lineal o no respectivamente. Este estado se llamará estado de referencia, donde las fluctuaciones pueden amortiguarse si dicho estado es estable o crecer enormemente si es inestable. En otras palabras, las fluctuaciones llegarán a ser enormes perceptibles a nivel microscópico si estamos cerca de puntos críticos que hacen inestable un estado de referencia (Callen, 1960; Nicolis and Prigogine, 1995).

Para encontrar este nuevo estado de la materia el sistema coherente y organizado, además de encontrarse lejos del equilibrio, el proceso tiene que ser irreversible y las leyes que gobiernan el comportamiento del sistema deben ecuaciones no lineales y adicionalmente deben existir elementos detonadores de la evolución como las fluctuaciones o un interés intrínseco a la propia naturaleza por seguir un proceso de minimización o maximización de un potencial o una función objetivo.

La dinámica o evolución en el tiempo de un sistema dependería de los valores extensivos de ciertos parámetros como la energía, el volumen, el número de moles, y otros parámetros debido a la influencia de campos externos (Campo eléctrico magnéticos, etc.) y al punto de partida (condiciones iniciales). También, las variaciones de estados individuales de cada partícula con respecto a sus promedios o fluctuaciones, pueden influir de manera dramática en la dinámica del sistema a nivel macroscópico para hacerlo evolucionar hacia nuevas estructuras con coherencia o sin ella (Prigogine, 1967; Glandorff and Prigogine, 1971; Nicolis and Prigogine, 1977; Nicolis, 1995).

Un sistema que está en equilibrio estable no puede evolucionar y posee simetría temporal y espacial, pero cuando se consideran los sistemas fuera del equilibrio, las estructuras auto-organizadas pueden surgir a escala macroscópica separadas por puntos de bifurcación (Prigogine and Nicolis, 1989; Glansdorff and Prigogine, 1971; Prigogine, 1996; Nicolis., 1995; Dewel, Kondepudi and Prigogine, 1996; Nicolis and Prigogine, 1977), donde la simetría temporal y espacial se rompe y los estados de la materia son coherentes con estructuras llamadas (Prigogine, 1978) “Estructuras Disipativas” (ver Figura 1).

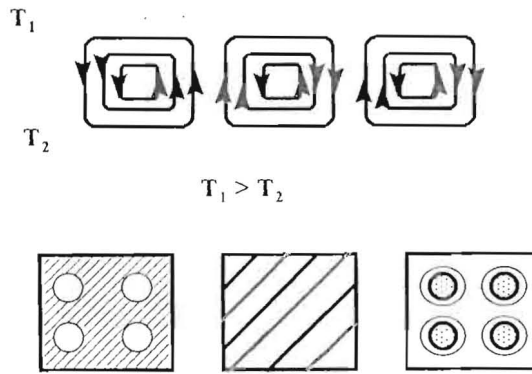


Figura 1. Nuevas Estructuras

En los casos, donde la respuesta del estado final de un sistema dinámico depende considerablemente de su estado inicial, sin embargo puede ser muchas veces predecible y denominará a esto CAOS determinista y la gran mayoría a de las veces sería impredecible y se llamaría CAOS indeterminista tal como lo mencionó Poincaré en 1908, Mandelbrot, en 1974 (Froyoland, 1992; Nicolis, 1995). También, en la naturaleza la mayoría de los sistemas físicos posiblemente es difícil determinar su estado futuro una vez que empiezan a evolucionar, en otras palabras su estado posterior no es determinado y en consecuencia, se requeriría de una teoría de eventos probabilísticos más aún si las variables que juegan en el proceso son de carácter aleatorio ((Maleck Mansour, Ph.D Theses, U.L.B, 1979).

La nueva visión de la naturaleza está relacionada con sistemas en equilibrio y en desequilibrio, como lo expresa Prigogine (Prigogine, 1998): *“nuestra visión de la naturaleza ha cambiado drásticamente. La ciencia clásica destaca la reversibilidad y estabilidad. Ahora vemos fluctuaciones, inestabilidad y procesos en evolución en todos los niveles, desde química y biología hasta cosmología”*.

Para encontrar este nuevo estado de la materia el sistema debe estar lejos del equilibrio, el proceso tiene que ser irreversible y las leyes que gobiernan el comportamiento del sistema deben ser un grupo de ecuaciones no lineales.

Es importante resaltar que la naturaleza se rige mediante modelos no lineales, la excepción corresponde a los modelos lineales simplificados, válidos solo bajo ciertas circunstancias muy definidas que no se alcanzan fácilmente. El mundo natural está lleno de

complejidad y caracterizado por soluciones de modelos basados en ecuaciones no lineales, las cuales son generadoras de inestabilidades que se activan ante cualquier fluctuación existente, y por lo tanto la gran mayoría de los casos son impredecibles. Todas estas razones acentúan la necesidad imperante de desarrollar métodos numéricos sofisticados para la solución de los sistemas de ecuaciones no lineales que resultan de los modelos matemáticos originales.

En resumen, las nuevas estructuras auto - organizadas denominadas estructuras disipativas requieren:

- **Que el sistema se encuentre lejos del equilibrio.** Los fuertes intercambios de energía y de materia entre el sistema y sus alrededores lo alejan del equilibrio hasta ubicarlo en estados críticos, inestables o de bifurcación.
- **El proceso debe ser irreversible.** Los fenómenos irreversibles como la transmisión de calor, de momentum y de especies, las reacciones químicas, etc. crean fluctuaciones en el interior del sistema, hacen que el sistema no sea isomorfo sensibilizando ciertas zonas a efectos externos inicialmente despreciable, v.g. la gravedad juega un papel relevante en la formación de los rollos de Benard después que el sistema alcanza el valor crítico de la diferencia de temperatura entre las dos placas (Nicolis, 1995).

Adicionalmente, los fenómenos irreversibles son generalmente acoplados, v.g. una diferencia de temperatura provoca un flujo de calor y al mismo tiempo un flujo de especie (flujo de calor y de materia están acoplados). Por consiguiente, la diferencia de temperatura en el interior del sistema, por una lado, provoca disipación de energía, transmitiendo calor al medio o incrementado la dispersión de estados en el interior del sistema (generación de entropía), y por el otro lado, provoca separación de especies inicialmente mezcladas, originándose el orden o auto - organización. El compromiso entre la disipación de energía controladas de acuerdo con las restricciones externas y la auto - organización colectiva de las partículas o elementos constitutivos del sistema, generan la diversidad de estructuras coherentes

- **Las leyes que gobiernan la evolución del sistema corresponden a ecuaciones o relaciones no lineales.** La matemática de la complejidad con relaciones recurrentes o con ecuaciones no lineales, donde los coeficientes que acompañan las variables que evolucionan en el tiempo dependen de dichas variables. En consecuencia, se necesita conocer el valor de la variable para conocer los coeficientes y a su vez, se necesita conocer los coeficientes para conocer las variables; lo cual se tiene un proceso recurrente o retroalimentado o autocatalítico si se trata de sistemas donde ocurren reacciones químicas.

Un una relación recurrente significa que el estado en el tiempo $N+1$ se construye a partir del estado anterior mediante la aplicación de operador L (ver Figura 2). El operador L puede ser construido de tal manera que haga que la función ϕ repita su acción un número de veces preestablecido a priori, a su vez la función ϕ corresponde a una ecuación propia del fenómeno físico de interés, Vg., ϕ puede ser la función que define una forma de dimensiones fijas y L , el operador que permite que dichas formas se reproduzca la forma un número finito de veces.

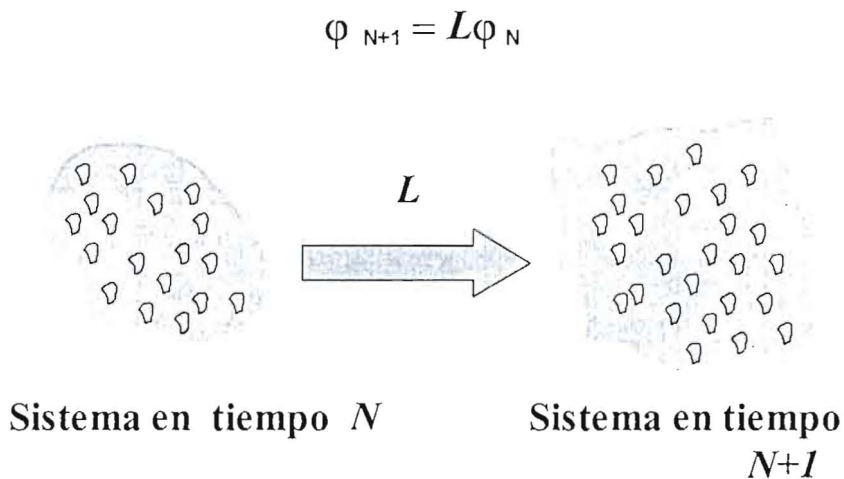


Figura 2. Esquema ilustrativo de una relación recurrente, la cual transforma el sistema de un tiempo N a otro posterior mediante la aplicación del operador L .

Un sistema de ecuaciones no lineal, también se puede construir con la hipótesis que la evolución de una de las variables depende del producto de la misma variable por otra variable que también evoluciona de la misma manera, tal como se ilustra en las ecuaciones (1):

$$\begin{aligned} dS/dt &= \alpha \cdot S - \beta \cdot S \cdot I \\ dI/dt &= \alpha \cdot I - \beta \cdot S \cdot I + \chi \end{aligned} \quad (1)$$

La variable **S** y la **I** pueden significar la medida de la satisfacción y del aburrimiento respectivamente. Así, la satisfacción (**S**) en un individuo evoluciona proporcionalmente positivo a la propia satisfacción y proporcionalmente negativo al producto del estado de satisfacción por el estado de aburrimiento (**I**), o sea, un individuo estará más satisfecho si posee alegría pero será menos feliz debido a la competición entre sus estados de satisfacción y aburrimiento.

Entre tanto, el aburrimiento evoluciona de manera similar a la evolución del estado de satisfacción pero un parámetro externo (χ) condiciona al individuo a estar más propenso al aburrimiento que a la satisfacción. Los coeficientes α y β en este sistema puede ser constantes, la no - linealidad del sistema lo conforma el acoplamiento de las variables **S** y **I** mediante un término que es el producto de estas dos variables, lo cual significa ambos estados están correlacionados: el uno depende del otro (Ver Figura 3).

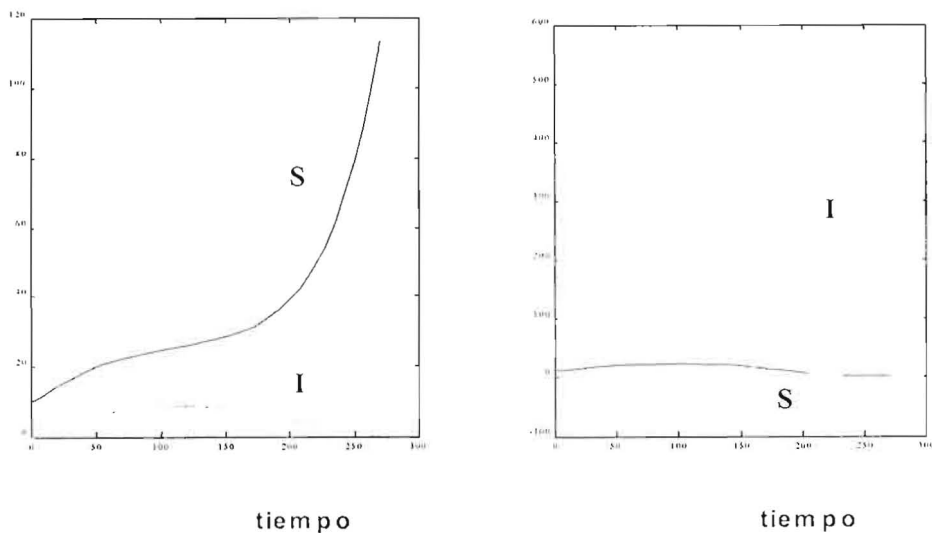
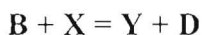


Figura 3. Evolución en el tiempo del estado de satisfacción y aburrimiento de un individuo para dos estados iniciales diferentes. Izquierdo: inicialmente el individuo satisfecho y no aburrido, Derecho: Inicialmente el individuo ligeramente más satisfecho que aburrido.

En la Figura 3 se observa la solución del sistema de ecuaciones (1) para dos condiciones iniciales diferentes. En la gráfica izquierda de la Figura 3 se ilustra la predicción de un estado de satisfacción plena sin aburrimiento, cuando el individuo está inicialmente mucho más satisfecho que aburrido. Situación contraria se aprecia si el individuo está inicialmente un poco más satisfecho que aburrido como se observa en el gráfico derecho de la Figura 3.

En el caso de reacciones autocatalíticas se presenta la producción de especie que a su vez es necesaria para producirse así mismo, tal como sucede en el modelo del "brussellator" ampliamente estudiado por la escuela de Bruselas (Nicolás and Prigogine, 1977; Nicolis, 1995; Prigogine, 1967):



Las especies A y B son flujos constantes que entran al sistema para producir D y E. Sin embargo, las especies intermedias X y Y pueden variar en el tiempo, adicionalmente, es necesario producir X para que con ella misma se utilice para producir de nuevo X como se ilustra en la Figura 4 y es lo que se llama procesos autocatalíticos.

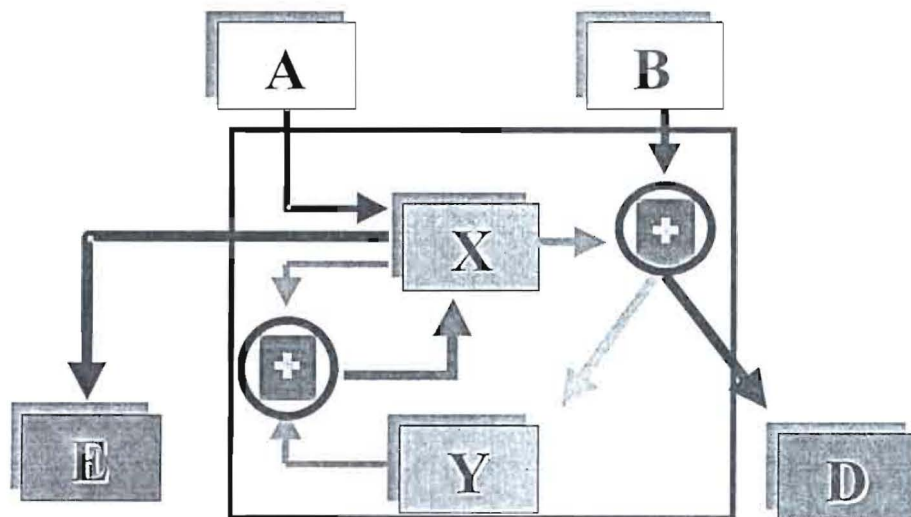


Figura 4. Esquema ilustrativo del modelo del "Brusselltor"

Sistemas autocatalíticos como el ilustrado en la Figura 4 son los observados en los sistemas biológicos (Prigogine, 1996), lográndose con esto, la conexión de la termodinámica con los sistemas complejos con gran variedad de comportamientos y estructuras.

De esta manera, los sistemas evolucionan lejos del equilibrio hasta alcanzar un estado coherente y ordenado después de alcanzar un punto crítico o de bifurcación (Nicolis, 1995). A partir de éste punto (ver Figura 5), el sistema posee varias alternativas para escoger y una vez, se elija de manera aleatoria un camino, el sistema se comportará como un todo, se crean interacciones de largo alcance que garantizan la coherencia del sistema globalmente.

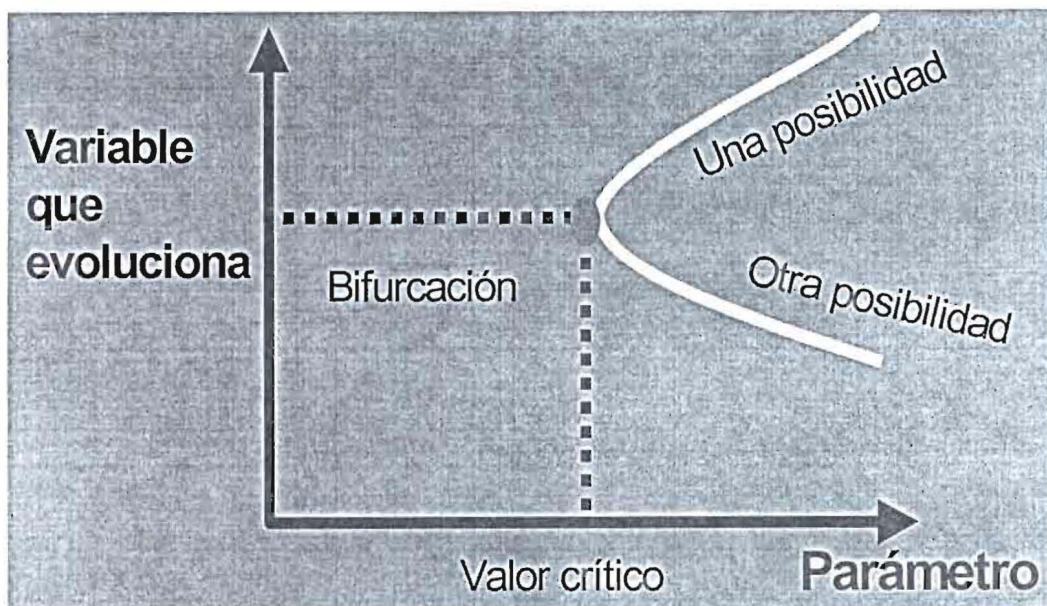


Figura 5. Esquema ilustrativo de un punto de bifurcación.

No obstante, las ecuaciones de evolución (1) y la (2) se consideran fenomenológicas y deterministas, las cuales se basan en las ecuaciones de balance de los observables macroscópicos del sistema. Con base en Nicolis (Prigogine, 1988), estas ecuaciones no contienen una descripción completa, en la medida que todo sistema físico genera variaciones espontáneas en torno a los valores instantáneos de los observables macroscópicos, denominadas *fluctuaciones*, que alteran la dinámica del sistema de una manera significativa. Por lo tanto, se debe utilizar una descripción matemática que de cuenta de las fluctuaciones y de las correlaciones como el formalismo estocástico (Nicolis and Prigogine, 1977), donde las ecuaciones deterministas se sustituyen por ecuaciones de probabilidades como la ecuación Maestra, la Fokker-Plank y la de Kolmogorov.

1.2. Sistemas Termodinámicos

Prigogine et al. (Prigogine, 1996). Escribió en su libro “Modern Thermodynamic” : “La descripción termodinámica de los procesos de la naturaleza usualmente comienzan dividiendo el mundo en un sistema y su exterior (ambiente), el cual es el resto del mundo”.